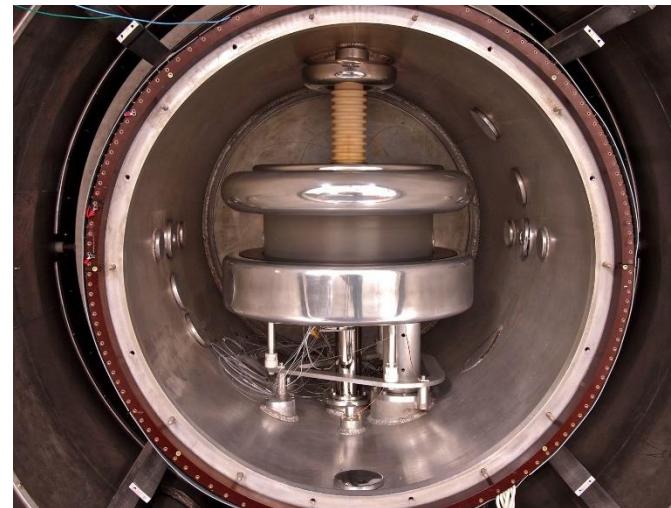


Mesure du moment dipolaire électrique du neutron

Correction des inhomogénéités magnétiques





- Asymétrie matière / antimatière de l'univers
 - Absence de noyaux complexes d'antimatière
 - Pas d'excès de rayonnement (annihilation)
 - Conditions de Sakharov
 - Non conservation du nombre baryonique → Mécanisme des sphalérons
 - Interactions hors équilibre → Baryogénèse électrofaible
 - Température ~ 100 GeV
 - Quand le champ de Higgs a pris une valeur non nulle
 - Violation de C et CP
- Violation de CP du MS **INSUFFISANTE** → **EDM des particules fondamentales**
- NECESSAIRE**

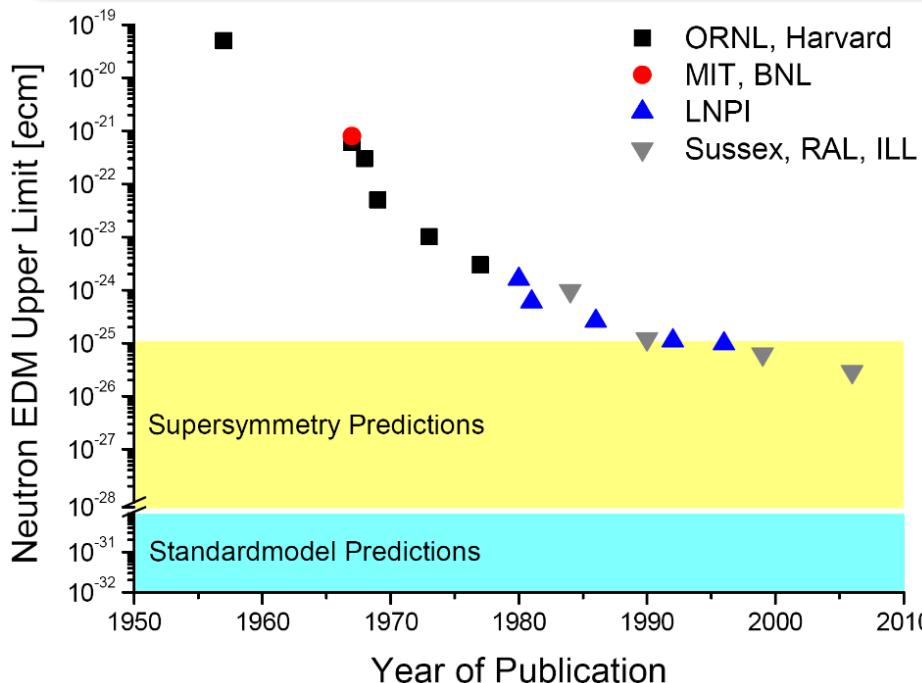
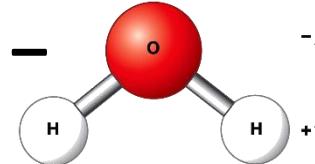
Introduction

Moment dipolaire électrique du neutron

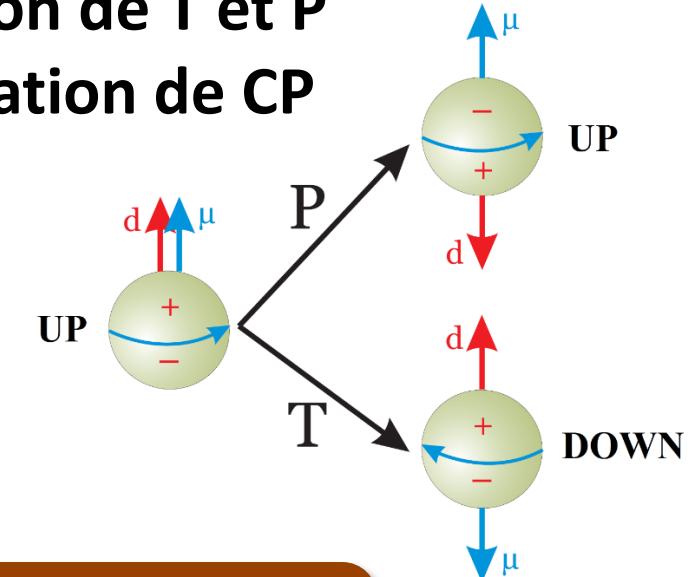


Moment Dipolaire Electrique (EDM)

- Distance centres des charges + et -
- Couplage spin / champ électrique externe



Violation de T et P
→ violation de CP



$$d_n < 3,0 \times 10^{-26} e \text{ cm} \text{ (90\% NC)}$$

- Prédictions du MS $\rightarrow 10^{-32} e \text{ cm}$
 - Bruit de fond négligeable
- Prédictions modèles $\rightarrow 10^{-25} \text{ à } 10^{-29} e \text{ cm}$

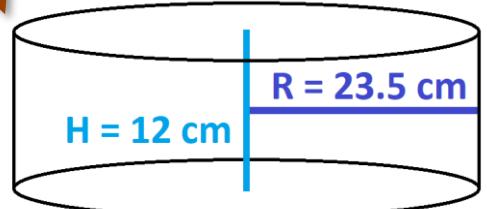
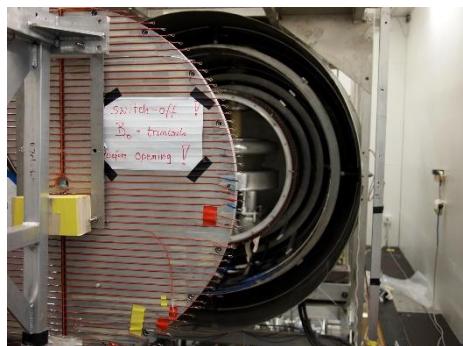
nEDM à l'Institut Paul Scherrer

L'expérience

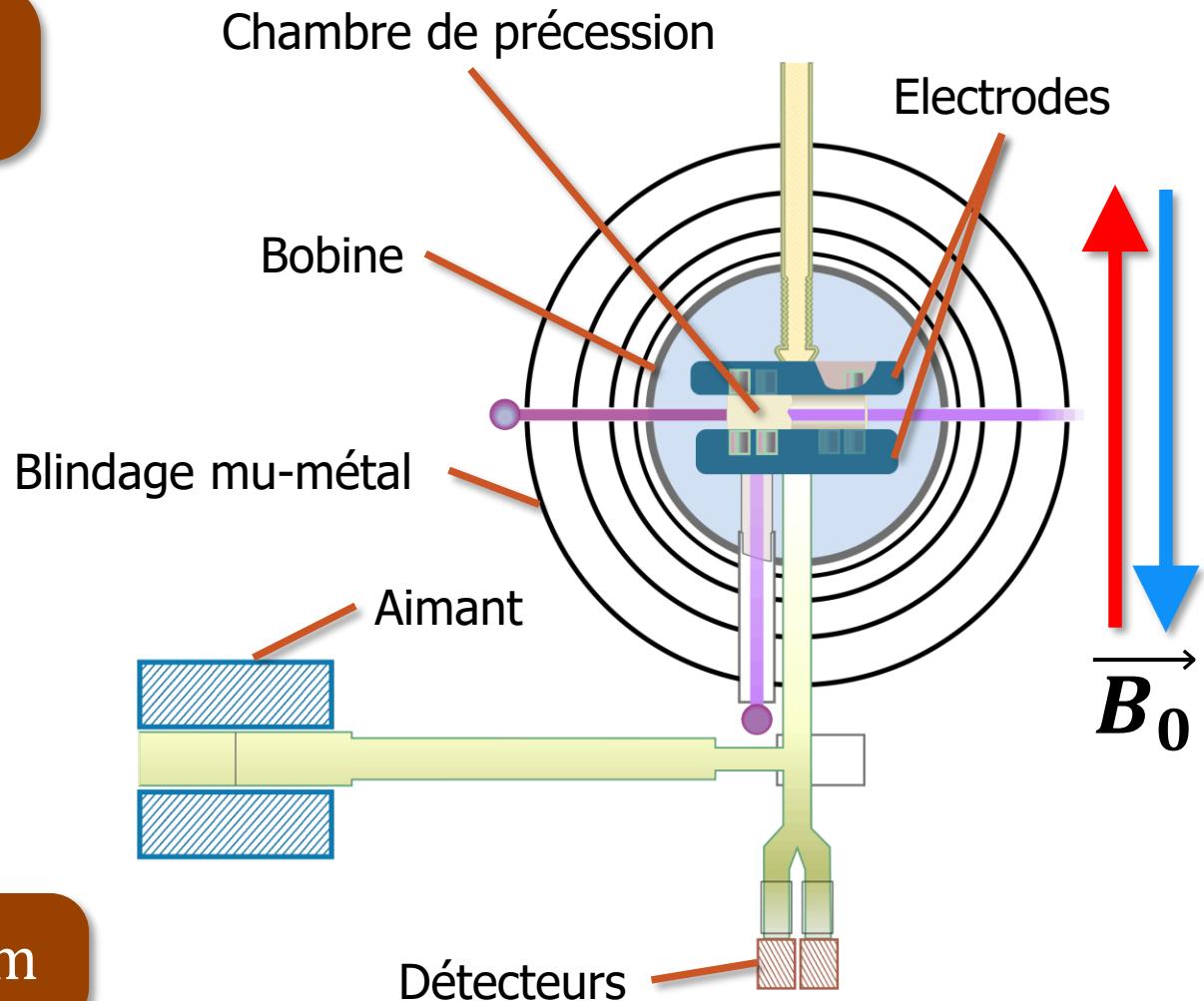
3



$$f_n = \frac{2}{\hbar} |\mu_n B \pm d_n E|$$



Sensibilité statistique $\rightarrow 1.1 \times 10^{-26} e \text{ cm}$

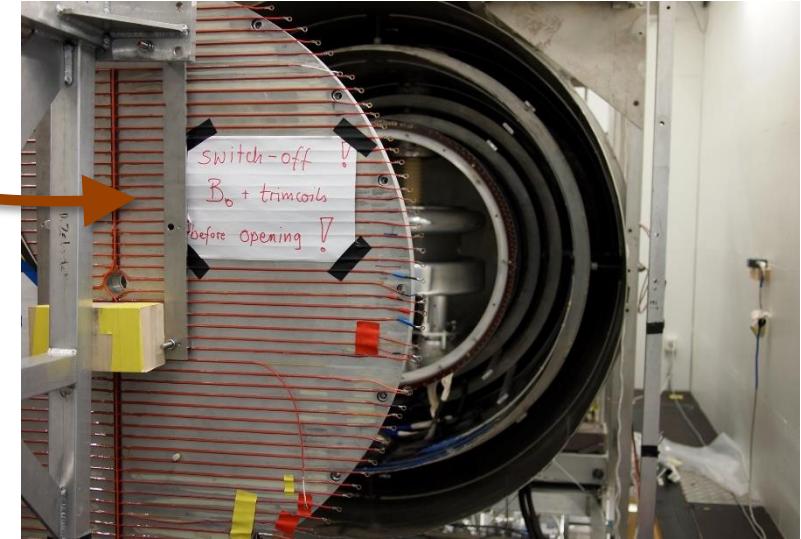


nEDM à l'Institut Paul Scherrer

Le champ magnétique

4

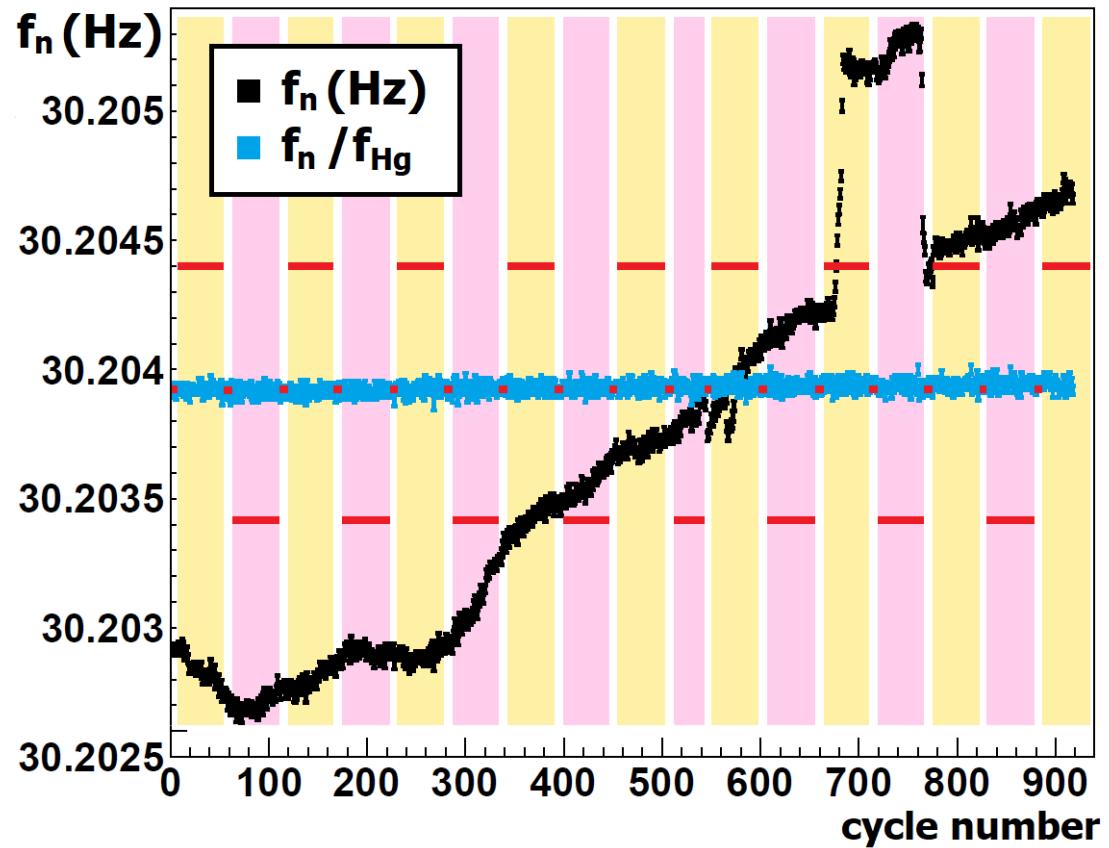
- Champ vertical de $1 \mu\text{T}$ produit par B_0
 - Champ très homogène $\rightarrow \frac{\delta B_0}{B_0} \sim 10^{-3}$
- Réduction des inhomogénéités
 - 33 bobines de compensation (trimcoils)
- 1 run nEDM :
 - B_0 **up** ou **down**
 - Courants i_{coil} dans les trimcoils
 - Inhomogénéités minimisées
 - 1 valeur de gradient linéaire





$$f_n = \frac{2}{h} |\mu_n B \pm d_n E|$$

- Fluctuations temporelles du champ
 - Correction de f_n par co-magnétomètre Hg



- Signal EDM
- +E
- 0
- -E

Décomposition du champ

- issue des harmoniques sphériques
- Mode l → ordre du polynôme
- Mode m → dépendance selon φ

$$\vec{B} = \sum_{l \geq 0} \sum_m G_{l,m} \vec{\Pi}_{l,m}(\rho, \varphi, z)$$

$G_{l,m}$ → gradients magnétiques

nEDM à l'Institut Paul Scherrer

Inhomogénéités magnétiques



- Faux EDM relativiste du Hg
 - Champ relativiste $\vec{v} \times \vec{E}/c^2$
 - Inhomogénéités magnétiques

$$d_n = d_n^{\text{vrai}} + d_{n \leftarrow \text{Hg}}^{\text{faux}}$$

$$d_{n \leftarrow \text{Hg}}^{\text{faux}} = \frac{\hbar \gamma_n \gamma_{\text{Hg}} R^2}{8 c^2} (\mathbf{G}_{\text{grav}} + A \mathbf{G}_{3,0} + \dots)$$

- Décalage gravitationnel $\langle z \rangle \sim 0,3 \text{ cm}$
 - Hg gazeux (uniforme dans la chambre)
 - UCN très peu énergétiques

Gradient cubique $\mathbf{G}_{3,0}$

$$\Pi_{3,0,z} = \left(z^3 - \frac{3}{2} \rho^2 z \right)$$

Gradient gravitationnel

$$\mathbf{G}_{\text{grav}} = G_{1,0} + B \mathbf{G}_{3,0} + \dots$$

$$\mathcal{R} = \frac{f_n}{f_{\text{Hg}}} = \left| \frac{\gamma_n}{\gamma_{\text{Hg}}} \right| \cdot \left(1 + \frac{\langle z \rangle}{B_0} \mathbf{G}_{\text{grav}} \right)$$

nEDM à l'Institut Paul Scherrer

Inhomogénéités magnétiques

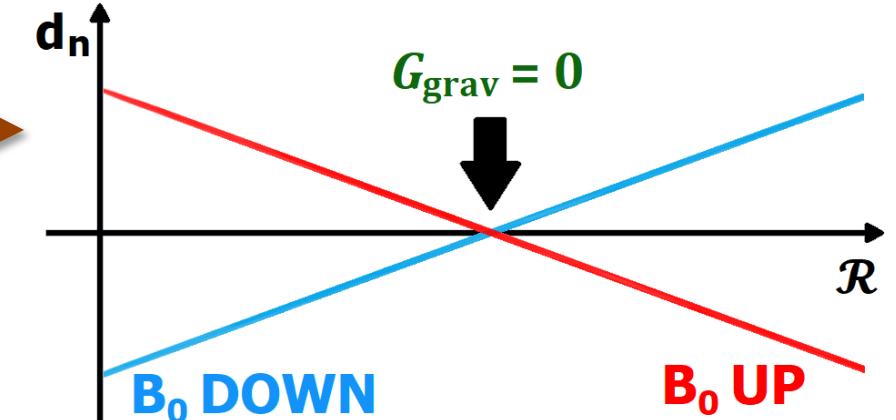
7

$$d_{n \leftarrow Hg}^{\text{faux}} = \frac{\hbar \gamma_n \gamma_{Hg} R^2}{8 c^2} (\mathbf{G}_{\text{grav}} + A \mathbf{G}_{3,0} + \dots)$$

$$\mathcal{R} = \frac{f_n}{f_{Hg}} = \left| \frac{\gamma_n}{\gamma_{Hg}} \right| \cdot \left(1 \pm \frac{\langle z \rangle}{B_0} \mathbf{G}_{\text{grav}} \right)$$

- B_0 up/down + gradient linéaire → Plusieurs valeurs de \mathbf{G}_{grav}
- Soustraction de $\mathbf{G}_{3,0}$
- $d_n = d_n^{\text{vrai}} \pm \alpha \left(\left| \frac{\gamma_{Hg}}{\gamma_n} \right| \mathcal{R} - 1 \right)$
- $\Delta G_{3,0} \sim 0,006 \text{ pT/cm}^3 \Rightarrow \Delta d_n \sim 4 \times 10^{-27} e \text{ cm}$

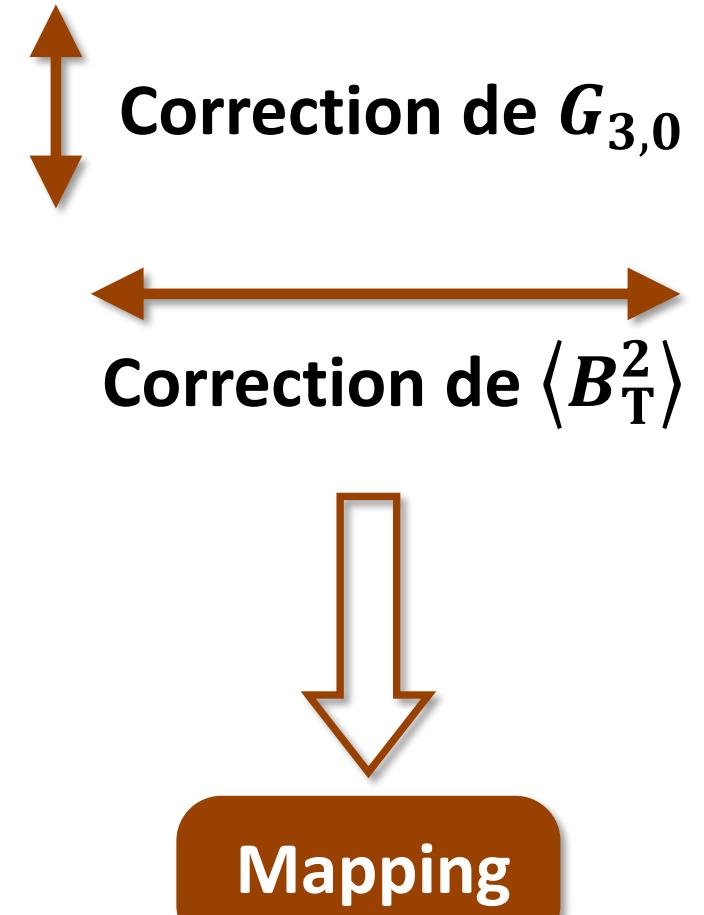
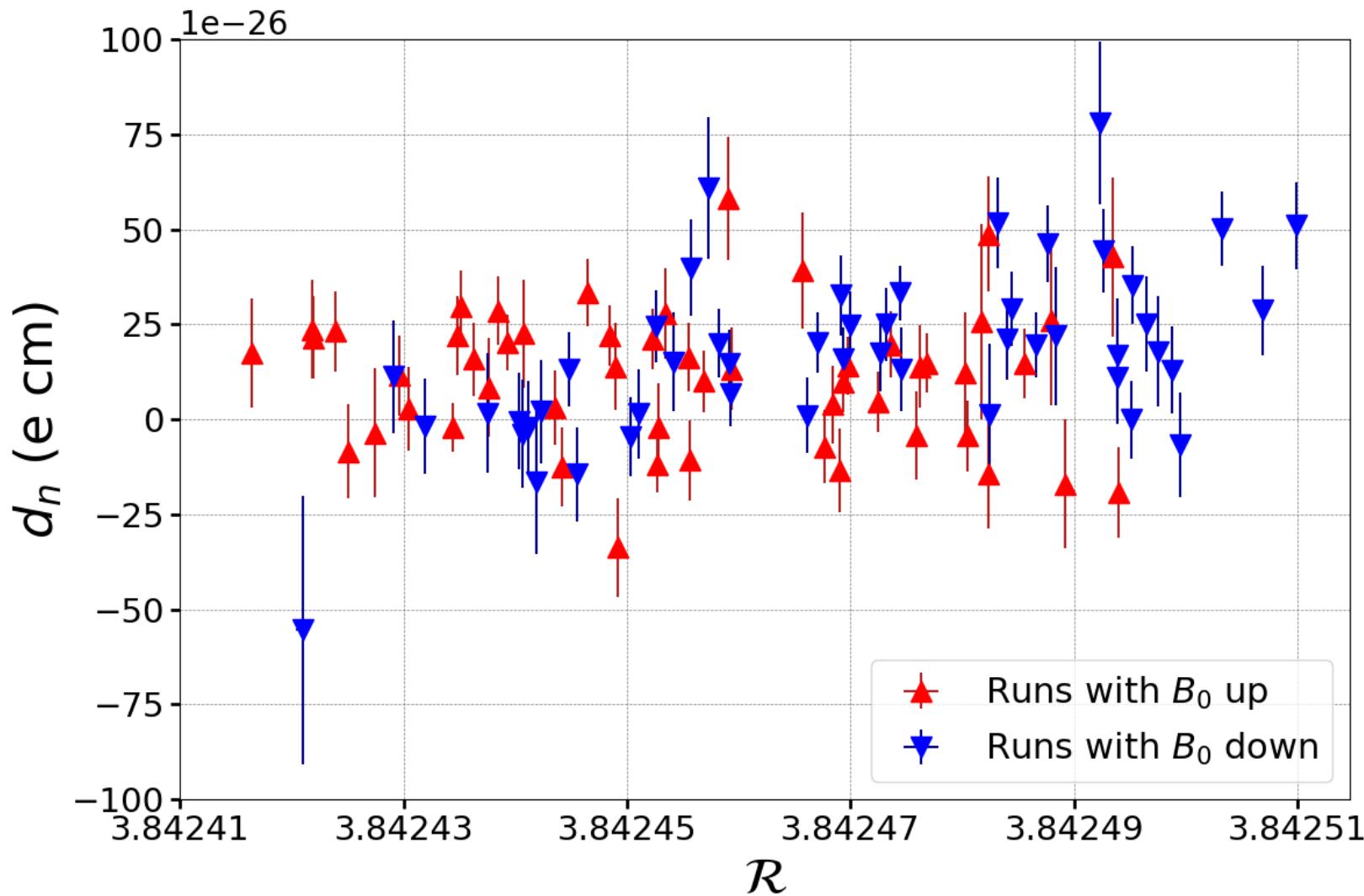
→ Le gradient cubique $G_{3,0}$ doit être connu avec une grande précision !



$$d_n = d_n^{\text{vrai}} \text{ quand } \mathbf{G}_{\text{grav}} = 0$$

nEDM à l'Institut Paul Scherrer

Analyse du point de croisement



Mapping

Panorama du mapping

9

- Objectif : $G_{3,0}$ et $\langle B_T^2 \rangle$ par run



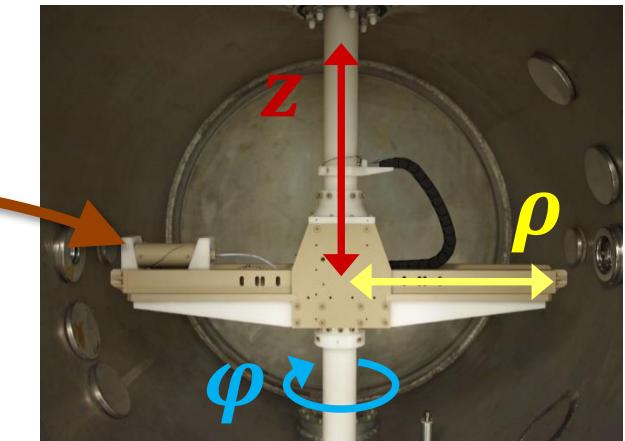
- Mapper

- Fluxgate (magnétomètre à 3 axes)
- Déplacement radial sur bras rotatif

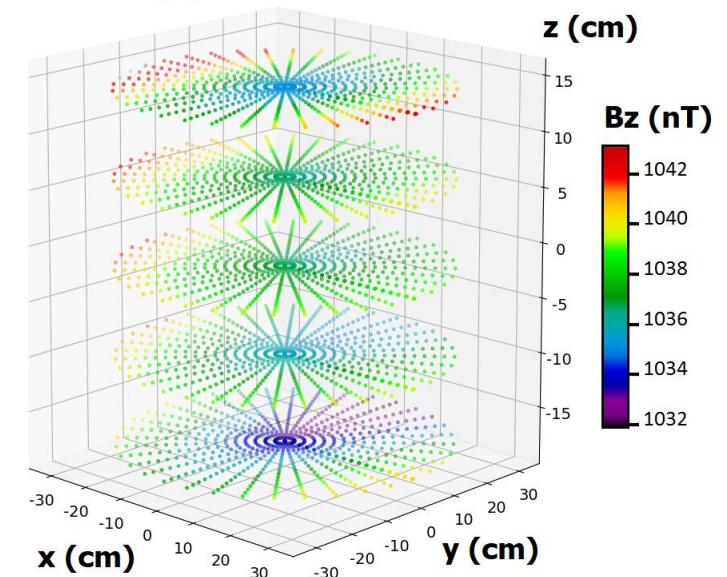


- 3 campagnes (2013, 2014 et 2017) ~ 300 cartes

- Champ rémanent
- Bobine B0 up et down
- Bobines de compensation
- Configurations magnétiques runs EDM
- Cartes séparées par un degaussing

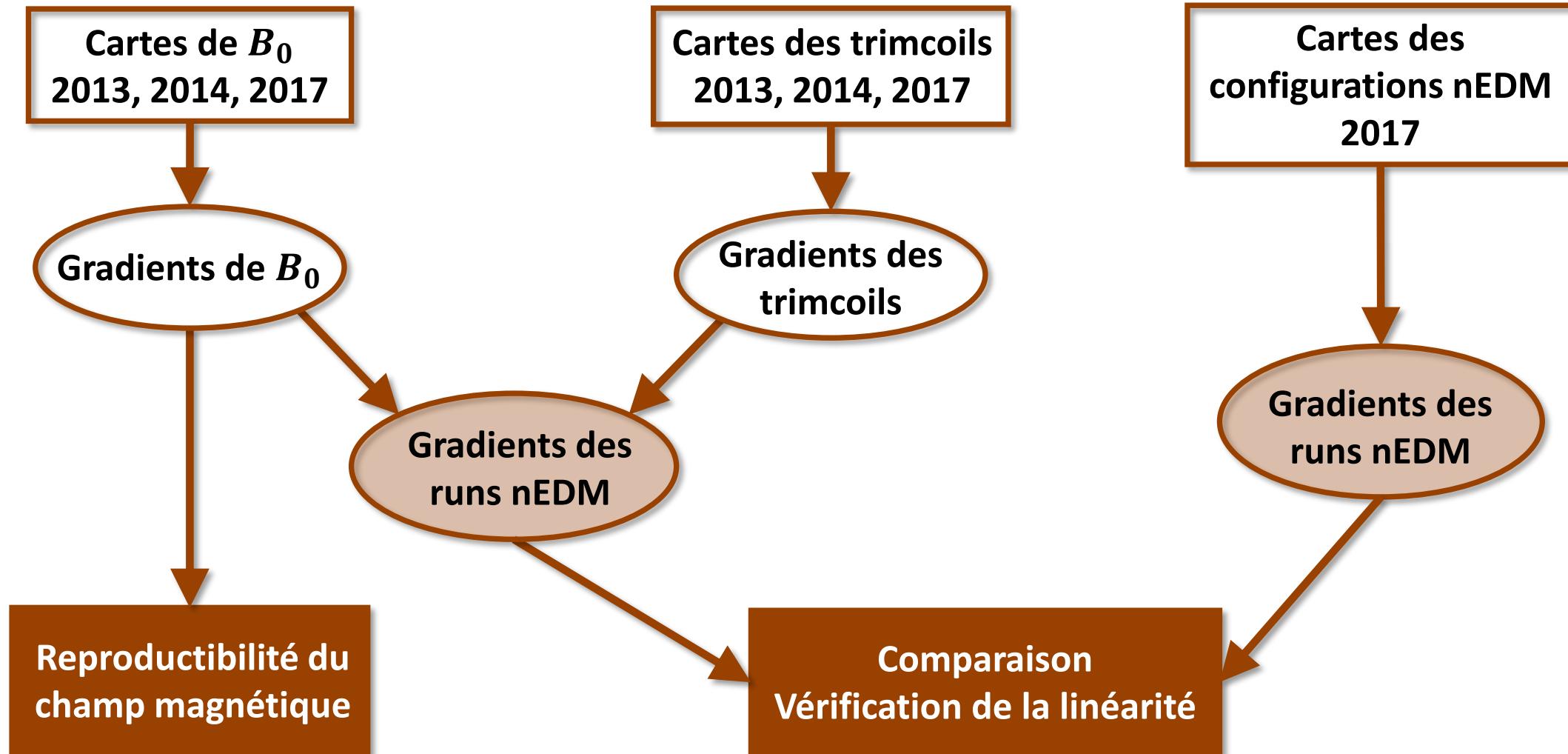
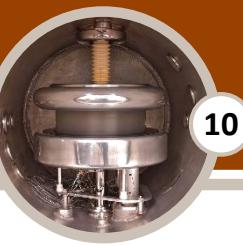


B_0 up map: B_z field



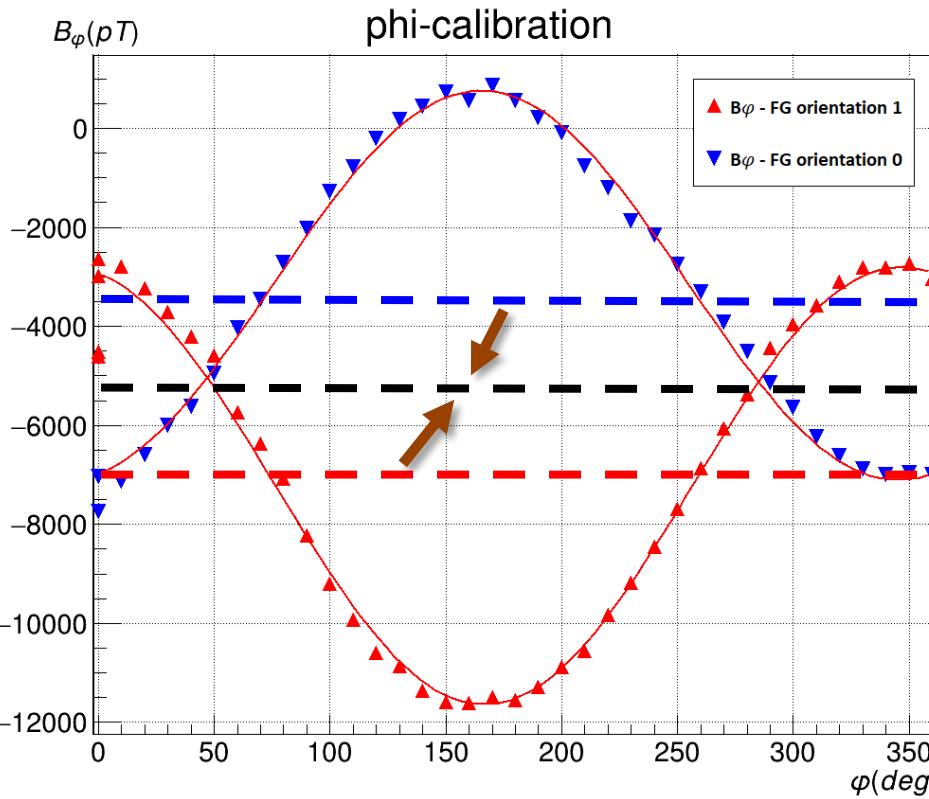
Méthode d'analyse

Principe d'analyse global



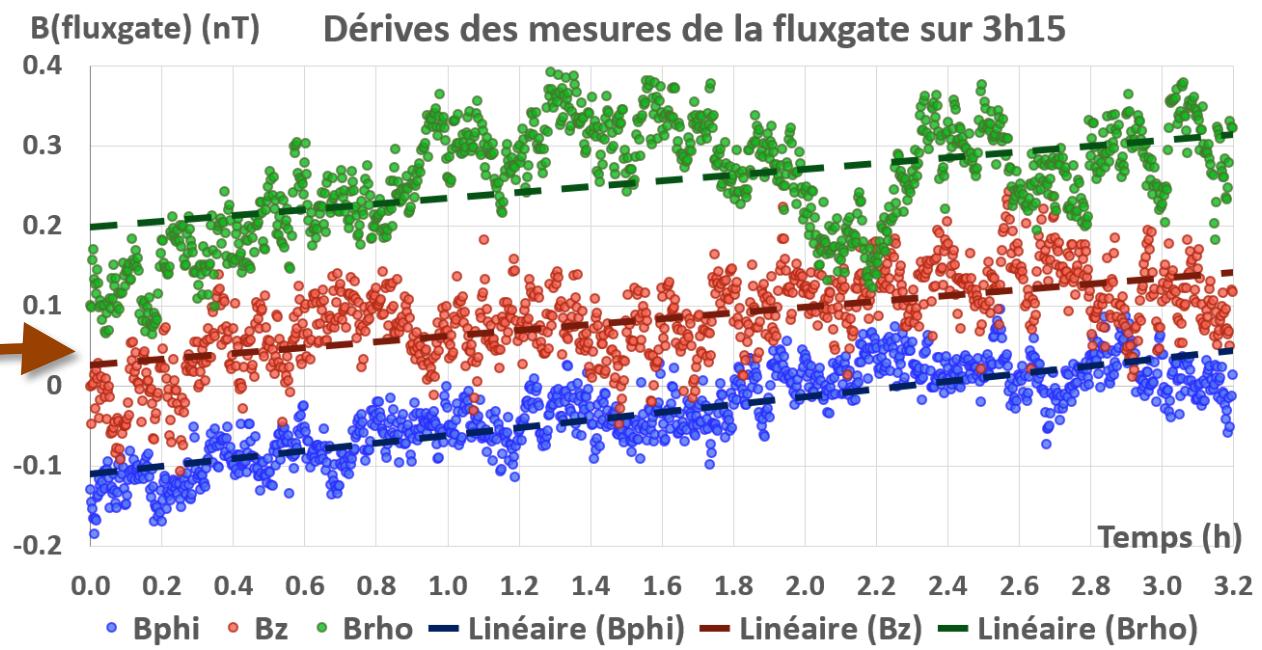
Méthode d'analyse

Calibrations et dérives des offsets



- 1 offset par capteur de la fluxgate (~ 10 nT)
 - Calibration du détecteur
 - Ajustement par $A + B \cos \varphi + C \sin \varphi$

- Dérive à long terme de l'offset
 - Calibrations **avant** et **après** une carte
 - Extrapolation linéaire de la dérive



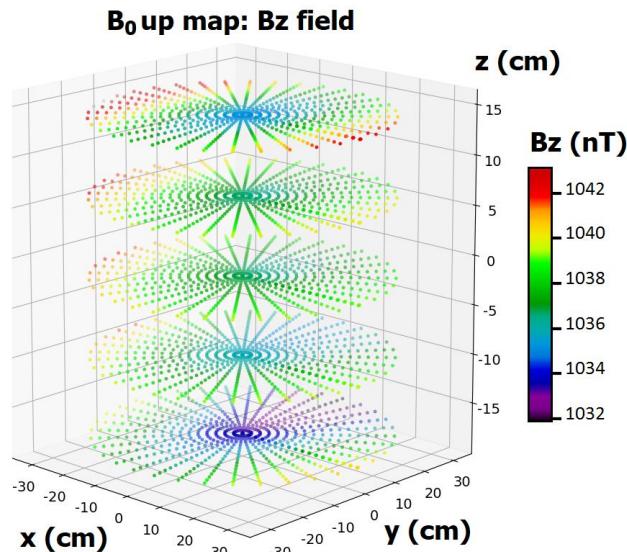
Méthode d'analyse

Analyse d'une carte

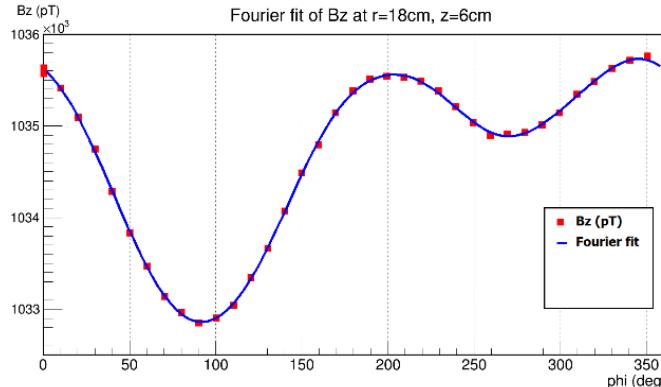


12

Ensemble de cercles



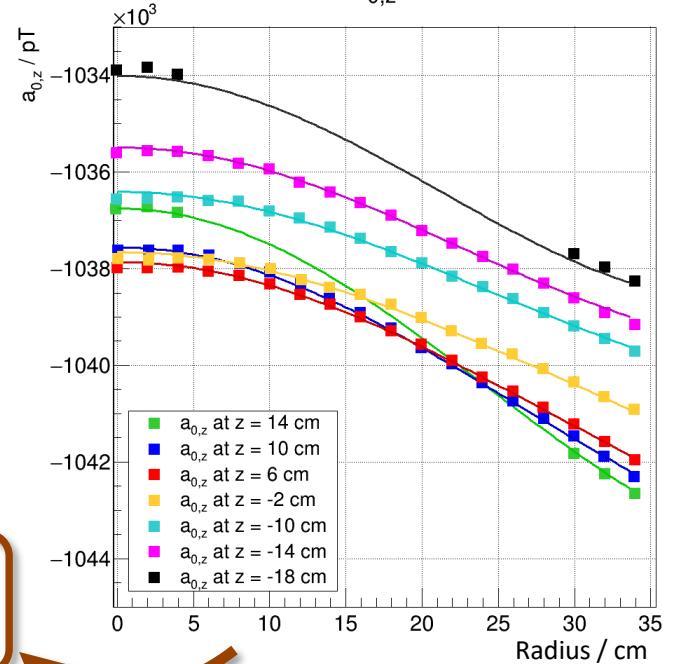
Analyse de Fourier, cercle par cercle



Ensemble de coefficients de Fourier

Ajustement avec les modes harmoniques du champ

a_{0,z} (pT)



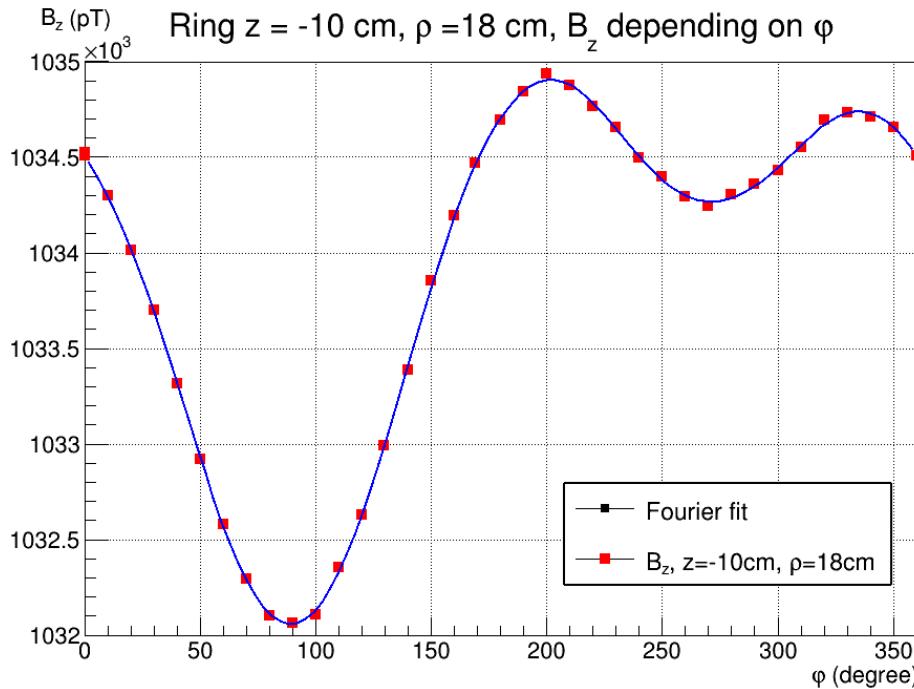
G_{3,0}
⟨B_T²⟩

Recombinaison pondérée
des 3 axes d'analyse

Ensemble de Gradients G_{l,m}

Méthode d'analyse

Analyse de Fourier



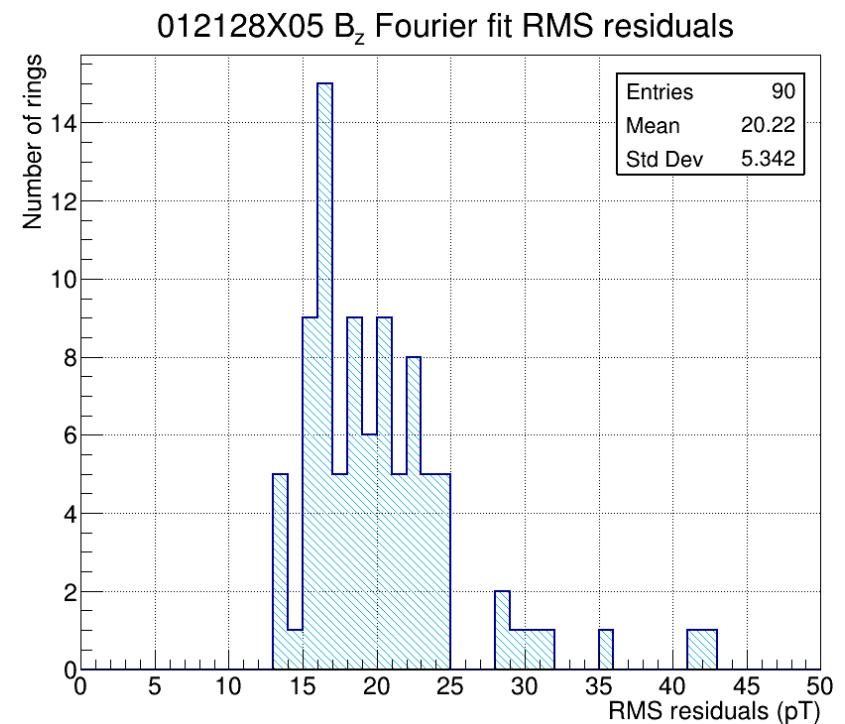
- Ajustement par minimisation du χ^2

- Erreur sur le champ inconnue

- Renormalisation de Δa_m et Δb_m par $\sqrt{\frac{\chi^2}{N_{\text{ddl}}}}$

- Série de Fourier jusqu'à l'ordre 6 $\rightarrow N_{\text{ddl}} = 25$

$$B_z(\varphi) = a_{0,z} + \sum_{m=1}^6 a_{m,z} \cos(m\varphi) + b_{m,z} \sin(m\varphi)$$



Méthode d'analyse

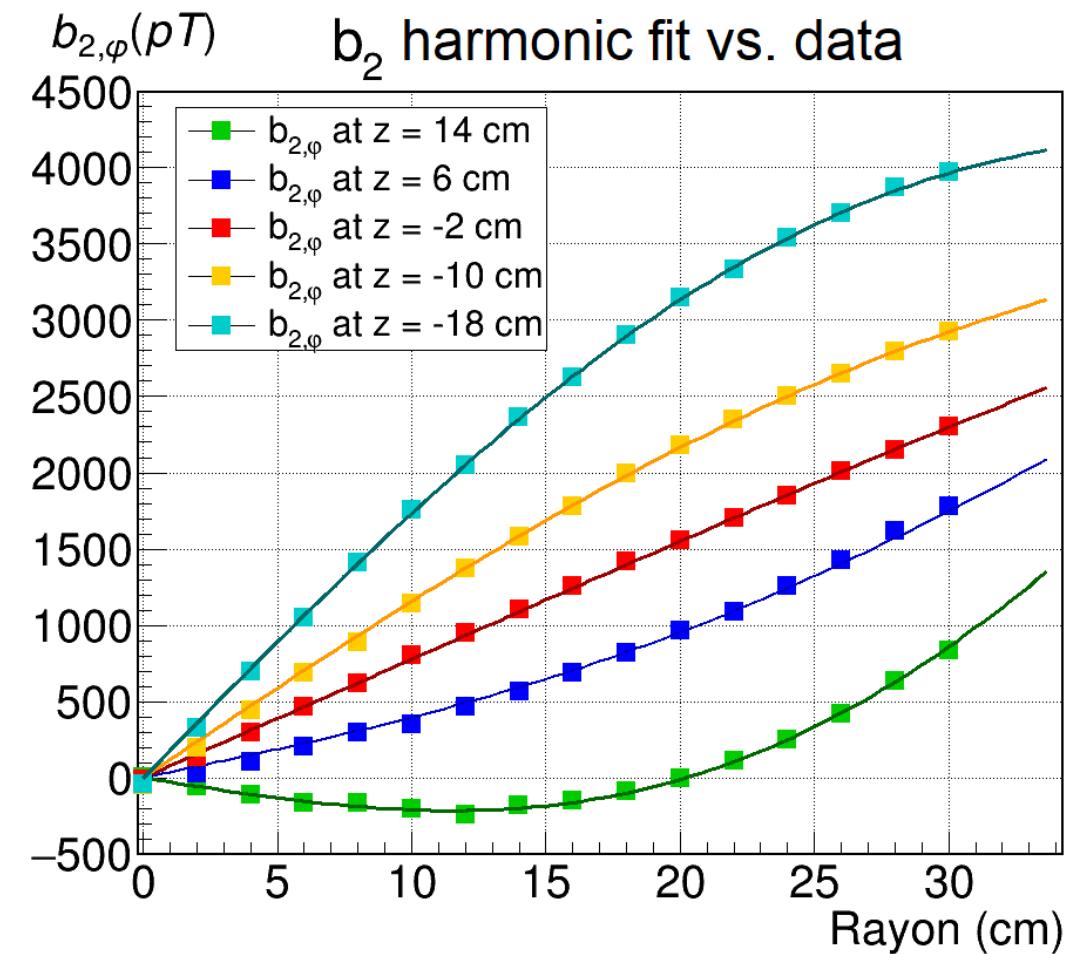
Ajustement par les harmoniques



- Ajustement des coefficients de Fourier
 - Minimisation du χ^2
 - Par ordre m
 - Jusqu'à l'ordre 6
 - $\Delta G_{l,m}$ obtenus par propagation des erreurs

$$a_{m,z}(\rho, z) = \sum_{l \geq 0}^6 G_{l,m} \hat{\Pi}_{l,m}(\rho, z)$$

$$b_{m,z}(\rho, z) = \sum_{l \geq 0}^6 G_{l,-m} \hat{\Pi}_{l,-m}(\rho, z)$$

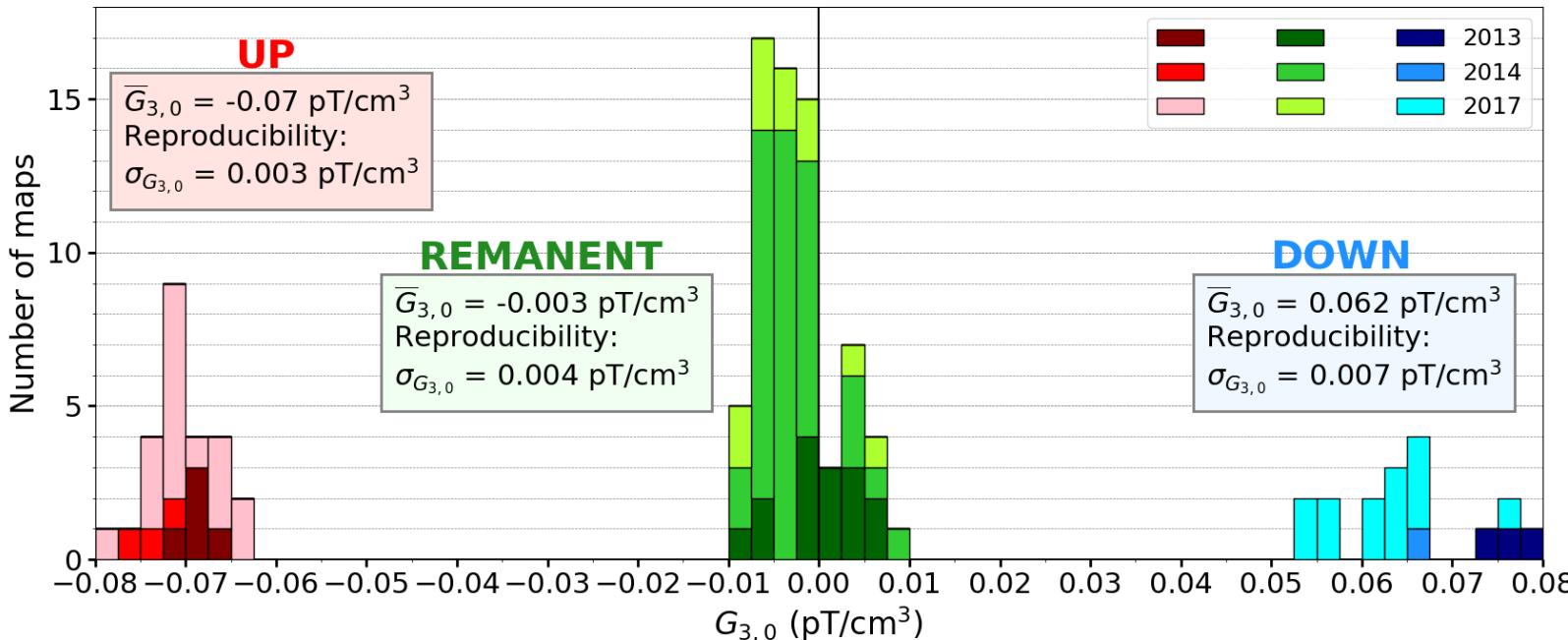


Résultats d'analyse

Reproductibilité du champ



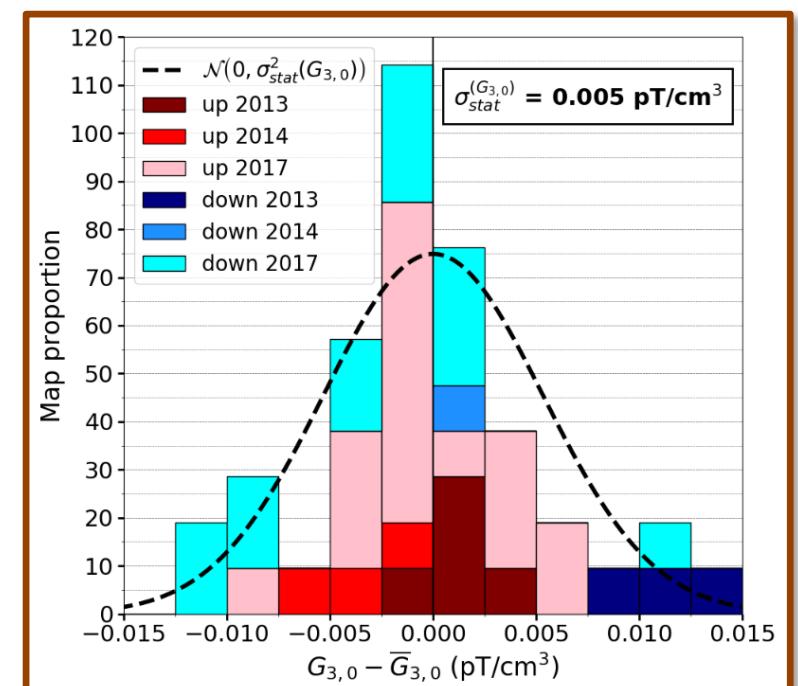
15



$$G_{3,0} \sim 0,07 \text{ pT/cm}^3 \Rightarrow d_{\text{n} \leftarrow \text{Hg}}^{\text{faux}} \sim 4,7 \times 10^{-26} e \text{ cm}$$

$$\Delta G_{3,0} \sim 0,006 \text{ pT/cm}^3 \Rightarrow \Delta d_{\text{n} \leftarrow \text{Hg}}^{\text{faux}} \sim 4 \times 10^{-27} e \text{ cm}$$

- Cartes B_0 : 26 up / 17 down
- $\sigma_{\text{stat}}^{(G_{3,0})} > \Delta_{\text{fit}}^{(G_{3,0})}$



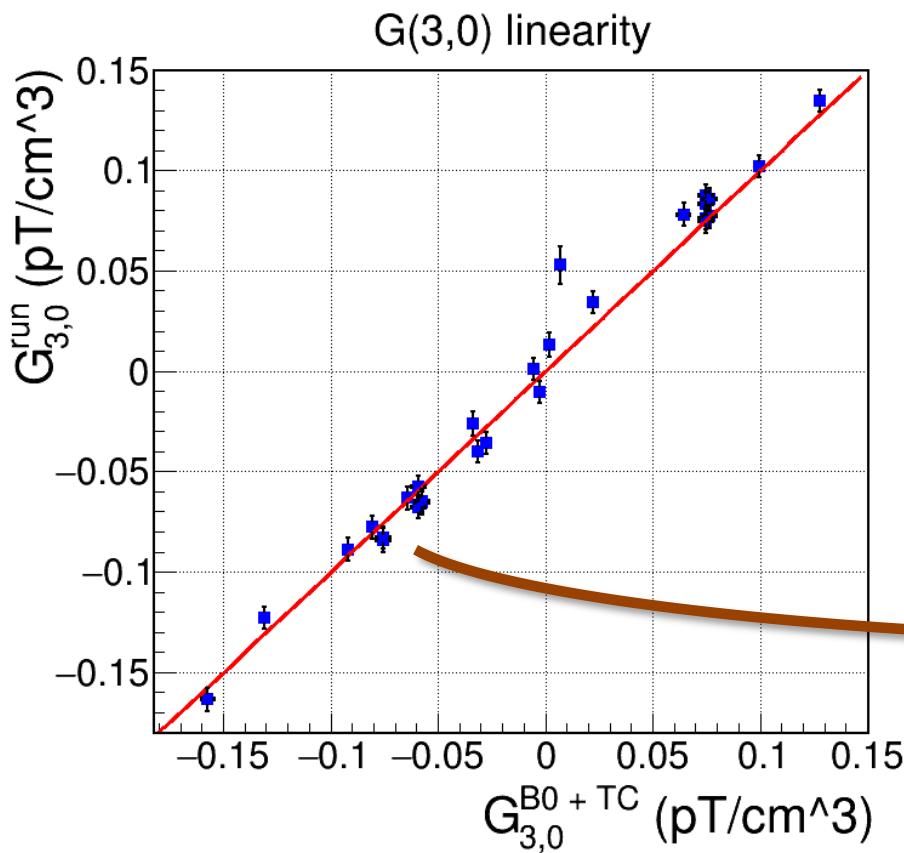
Résultats d'analyse

Linéarité des gradients



16

Cartes de runs EDM
1 run = 1 carte

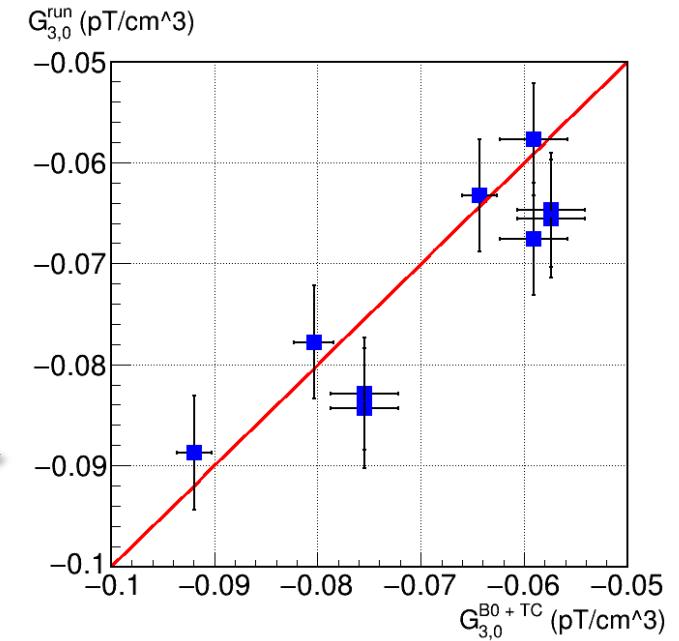


**MESURE vs.
PREDICTION**

Synthèse des cartes B_0 + TrimCoils
1 run = cartes B_0 + cartes TC

$$\text{RMS}(G_{3,0}) = 0,007 \text{ pT/cm}^3$$

$$\sigma_{\text{stat}}^{(G_{3,0})} = 0,005 \text{ pT/cm}^3$$



Conclusion et perspectives

Conclusions sur le mapping



17

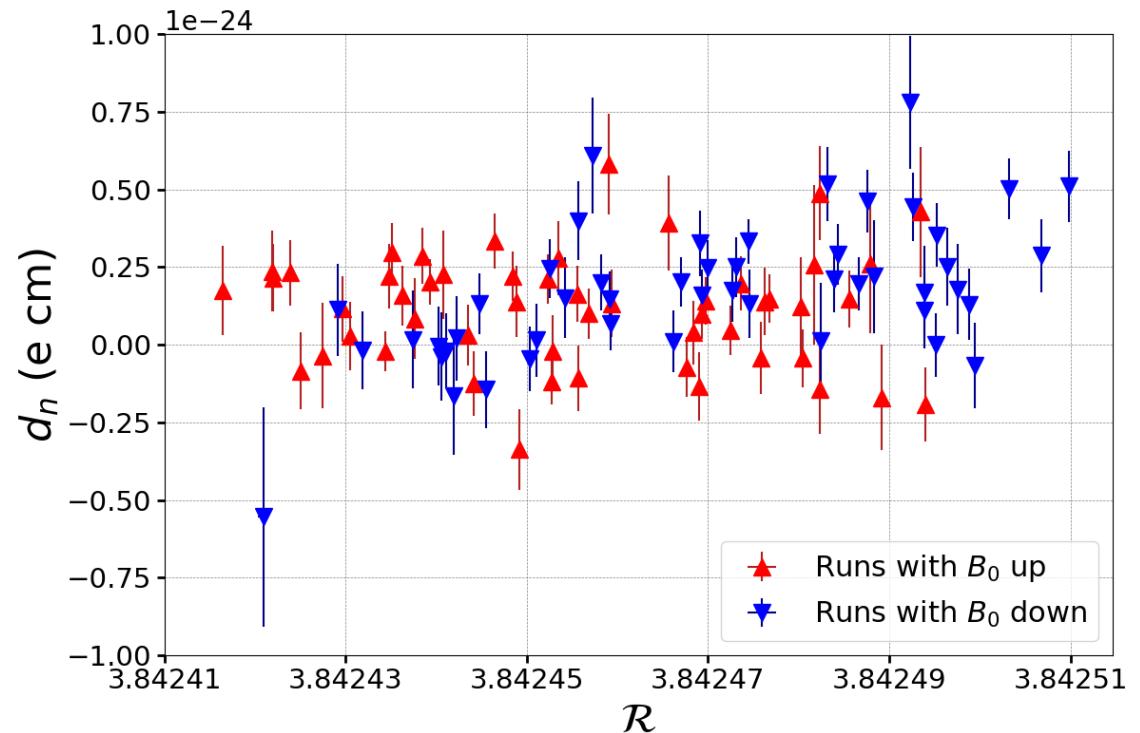
Gradient cubique $G_{3,0}$

- Erreur dominée par la reproductibilité
- Possibilité de production par linéarité
- RMS linéarité \sim reproductibilité

$$G_{3,0} \Rightarrow d_{n \leftarrow \text{Hg}}^{\text{faux}} \sim 4,7 \times 10^{-26} e \text{ cm}$$

$$\Delta G_{3,0} \Rightarrow \Delta d_{n \leftarrow \text{Hg}}^{\text{faux}} < 5 \times 10^{-27} e \text{ cm}$$

Sensibilité statistique $\rightarrow 1,1 \times 10^{-26} e \text{ cm}$



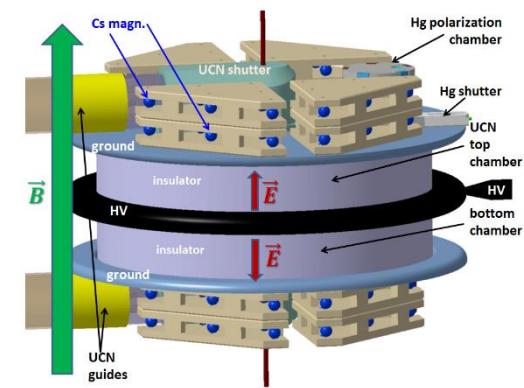
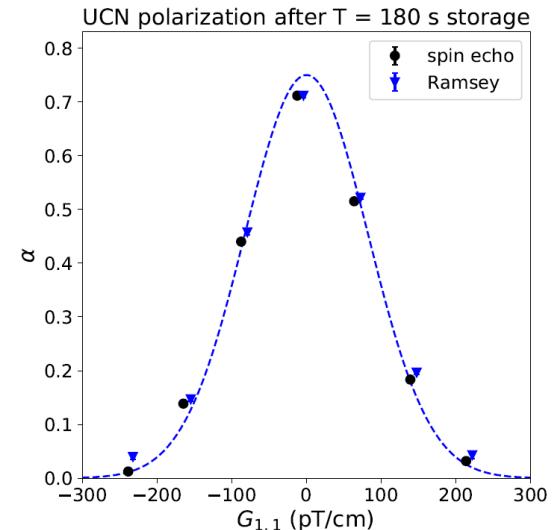
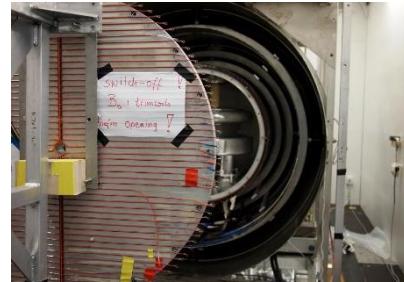
Conclusion et perspectives

Perspectives



18

- Etude du champ produit par B_0
 - Simulations des inhomogénéités attendues
 - Comparaison avec les résultats du mapping
- Etude de la dépolarisation en fonction des gradients
 - Runs dédiés (larges valeurs de gradients)
- Participation au software de mapping de n2EDM
 - Contrôle en direct de la qualité des données





Merci !